

Estudio multiespectral del cultivo de tuna para determinar los índices NDVI¹, CWSI² y SAVI³, a partir de imágenes SENTINEL 2A, en el cantón Guano, provincia de Chimborazo, Ecuador

(Multispectral study of tuna cultivation to determine the NDVI, CWSI and SAVI indexes from Sentinel 2A images, in Guano canton, Chimborazo province, Ecuador)

Hernán Chamorro Sevilla⁴, Alex Erazo⁵

Resumen

En este trabajo se evalúan: el Índice de Vegetación Diferencial Normalizado (NDVI, por sus siglas en inglés), el Índice de Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI, por sus siglas en inglés) y el Índice de estrés hídrico (CWSI, por sus siglas en inglés) en los cultivos de tuna, ubicados en el cantón Guano de la provincia de Chimborazo, Ecuador. El área de interés (AOI, por sus siglas en inglés) son las parroquias San Andrés y Guano, en las cuales se determinó la textura del suelo con los datos existentes en el Sistema Nacional de Información (SNI) del Ecuador, para ello se utilizó una imagen satelital de Sentinel 2A del 16 de junio de 2018; y mediante operaciones de funciones raster se obtuvo una media aproximada y referencial de NDVI, la reflectancia recibida tanto del suelo como del cultivo de tuna (SAVI) y la transpiración que corresponde al estrés hídrico (CWSI) de las parcelas de tuna. Finalmente, se obtuvieron datos aproximados y referenciales de NDVI con un valor de 0.31, valores de SAVI que reflejan datos del suelo y del cultivo y un CWSI muy bajo que determinan que la transpiración es mínima, por lo que se puede concluir que una de las posibles técnicas más adecuadas para incrementar la producción de la tuna es la de riego por goteo.

Palabras clave

NDVI; Multiespectral; reflectancia; SAVI; CWSI; SNI; Tuna (*Opuntia ficus*).

Abstract

This work evaluates the Normalized Differential Vegetation Index (NDVI), Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI), and Water Stress Index (CWSI) in tuna crops, located in the Guano Canton of Chimborazo Province, Ecuador. The area of interest (AOI) included the parishes of San Andres and Guano, in which the texture of the soil was determined with the existing data in Ecuador's National Information System (SNI); a satellite image of Sentinel 2A from June 16 2018 was used. Raster functions were applied to obtain an approximate and referential mean of NDVI the reflectance received from both the soil and the tuna crop (SAVI), and the perspiration corresponding to the water stress (CWSI) of the tuna plots. Finally, we obtained approximate and referential NDVI data with a value of 0.31, SAVI values reflecting soil and crop data, and a very low CWSI, showing that perspiration is minimal, so it can be concluded that drip irrigation is a suitable technique for increasing tuna production.

Keywords

NDVI; Multispectral; Reflectance; SAVI; CWSI; SNI; Tuna (*Opuntia ficus*).

1 Normalized Difference Vegetation Index.

2 Crop water stress Index

3 Soil-Adjusted Vegetation Index.

4 Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador (hernan.chamorro@espoch.edu.ec).

5 Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador (alex.erazol@espoch.edu.ec).

1. Introducción

El monitoreo satelital inició a finales de la década de los cincuenta y ha permitido el entendimiento de los ecosistemas silvestres revelando aspectos importantes de su diversidad y complejidad (Ruiz, Savé, y Herrera Herrera, 2014). La recepción remota para monitorear en forma regular los cambios de la vegetación se realiza con algoritmos especializados, dando como respuesta los cambios ambientales (Leiva, 2003).

Por otro lado, para caracterizar la viabilidad de la agricultura de precisión se utilizan herramientas tecnológicas como son los Sistemas de Posicionamiento Global (GPS, por sus siglas en inglés), sensores planta-clima-suelo e imágenes multiespectrales obtenidas a partir de satélites, aviones o UAS/RPAS que permiten el manejo de la variabilidad espacial y temporal a nivel de subparcela de campo para mejorar el retorno económico y reducir el impacto ambiental (Díaz García-Cervigón, 2015).

La tuna es una planta de gran importancia en los sistemas agro-pastoriles de los valles interandinos que cuentan con las condiciones adecuadas para su asentamiento. Los frutos pueden ser consumidos en forma natural o en sus derivados como mermeladas y bebidas (López Orozco, Mercado Flores, Martínez Soto, y Magaña Ramírez, 2011).

Para el cultivo de la tuna los requerimientos agroclimáticos son los siguientes: los suelos deben tener una textura franca, franco arcilloso arenosa, arenosos, franco arenoso con un pH 6.5-8.5, aunque el cultivo de tuna es tolerante a la falta de agua si se debería tener acceso a algún tipo de fuente de la misma con el fin de obtener mejores rendimientos. En cuanto a las condiciones climáticas apropiadas necesita de una temperatura anual de 16-28° C y una precipitación pluvial media anual de 150-1800 mm (Amaya Robles, 2009).

Por otro lado, en una investigación realizada por el *Diario El Comercio* el 15 de octubre de 2011, se señala que en el Ecuador poco o nada se conoce sobre el manejo de cultivo de tuna; a nivel nacional existen alrededor de 180 hectáreas de tuna sembradas y, puntualmente, indican que existen los siguientes tipos: amarilla con y sin espinas, la blanca y la silvestre repartidas en las provincias de Imbabura, Cotopaxi, Tungurahua, Chimborazo, Loja y Manabí (El Comercio, 2011).

La revista *Líderes* del Ecuador, señala que para producir tuna no se requiere de gran cantidad de agua ni de terreno húmedo, ya que existe una buena aceptación del producto en el mercado local por sus propiedades nutricionales y medicinales (Márquez, 2018).

El diario *La Hora* en octubre de 2011 publicó un artículo en el que señalaba que el cultivo de tuna ha ido ganando terreno en el norte del Ecuador, gracias a la creación del plan de producción e industrialización de la tuna en el año 2010, produciendo dos variedades la blanca y la amarilla (La Hora, 2018).

El Diario *El Telégrafo*, el 24 de octubre de 2017, publicó que en el cantón Guano, al momento existen plantaciones de tuna ubicadas en las comunidades: Hela, Santa Rosa de Guano, Miraflores, Carrera Ambato, Chingazo Alto, Chingazo Bajo, Alacao, San José de Chocón, Pungal San Pedro y San José de Juntuz (Maggi, 2017).

Los Índices de Diferencias Normalizadas de Vegetación (NDVI, por sus siglas en inglés), índice de estrés hídrico (CWSI, por sus siglas en inglés) y el índice de vegetación ajustada al suelo (SAVI, por sus siglas en inglés) utilizan las propiedades de reflexión diferencial de la vegetación en el espectro visibles e infrarrojo para monitorear la vegetación tanto en tiempo como en espacio (Gilabert Navarro, García-Haro, y González Piqueras, 1997). Es útil para estimar el índice de área foliar, la cobertura y dinámica vegetal, la deforestación y fragmentación de hábitats, la

Register for free at <https://www.scipedia.com> to download the version without the watermark

evaluación del suelo y estado de la vegetación, así como también los cambios interanuales del NDVI relacionados con el fenómeno de El Niño en diferentes regiones y cambios a nivel global (Rodríguez y Bullock, 2018).

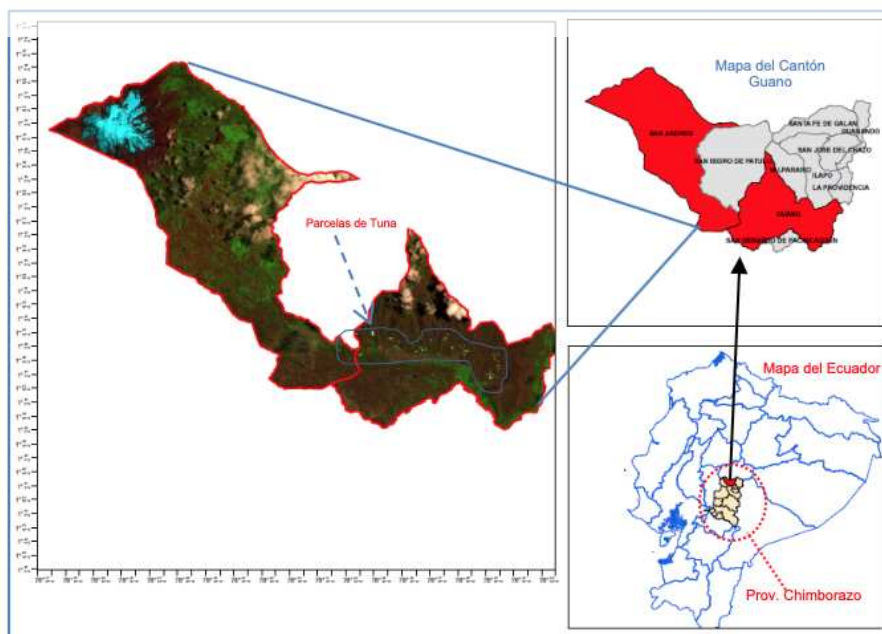
Estudios realizados sugieren que con un manejo adecuado de riego se influye de manera directa en la calidad del fruto, básicamente en la firmeza, ya que si el fruto es producido con un bajo déficit hídrico, este es más pequeño (Varela, Caldera, Zegbe, Mena, y Serna, 2014).

Esto ha motivado a que en la presente investigación se determinen los índices de NDVI, CWSI y SAVI del cultivo de la tuna en la zona antes señalada, para conocer el estado de salud de las plantaciones en una fecha determinada, aunque es un método simple, es un concepto importante para especificar el comportamiento de estos índices, combinados con el tipo y textura del suelo proporcionado por el Ministerio de Agricultura y Ganadería, se pueda implementar el sistema de riego más adecuado para la zona.

2. Metodología

En este estudio se analiza el comportamiento promedio del NDVI en las parcelas de tunas, cubre el área ubicada a $1^{\circ}35'00''$ S $78^{\circ}38'00''$ O, 2666 m.s.n. m., cerca de la ciudad de Riobamba se encuentran las parroquias Guano y San Andrés en el cantón Guano de la provincia de Chimborazo, en las comunidades de "Alacao, Carrera Ambato, Chingazo Alto y Bajo, Ela, La Merced, La Unión, Miraflores, San José de Chocón, San Andrés, San José de Juntuz y Santa Rosa" como se muestra la *Figura 1*, a partir de una imagen SENTINEL 2A que se obtuvo del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS, por sus siglas en inglés) (<https://earthexplorer.usgs.gov/>) la información se encuentra en formato Geo TIFF, aplicando la corrección atmosférica se obtuvo una resolución espacial de 10 m con información de alta sensibilidad radiométrica en las 13 bandas espectrales (Casella, Barrionuevo, Pezzola, y Winschel, 2018).

Register for free at <https://www.scipedia.com> to download the version without the watermark



Las bandas en Sentinel 2A utilizadas para monitorear la vegetación son 12 (11), 8A, 4, donde la reflectancia puede variar dependiendo del contenido de la humedad en la región del infrarrojo de onda corta (SWIR, por sus siglas en inglés) en la hoja o en el suelo; lo cual indica que la vegetación vigorosa o irrigada y las áreas ribereñas muestran un color verde claro; es decir valores mayores del NDVI, mientras que la tierra seca y áreas naturales son de color verde opaco que indica valores menores del índice. (Rodríguez y Bullock, 2018). En general el cálculo del NDVI se define como:

$$NDVI = \frac{R_{IRC} - R_R}{R_{IRC} + R_R} = \frac{B_2 - B_1}{B_2 + B_1} \quad [1]$$

Dónde: R_{IRC} y R_R son, respectivamente.

Los valores de reflectancia bidireccional de la superficie para las bandas del infrarrojo cercano y rojo, que son las bandas B2 y B1 de la imagen. (Salinas, Octavio, Martínez, y Morales, 2017).

El valor promedio del NDVI de cada parcela en el área de estudio se calculó con la siguiente fórmula:

$$\overline{NDVI} = \frac{\sum NDVI_{ij}}{n_{ij}} \quad [2]$$

Dónde: \overline{NDVI} es el promedio de NDVI de las parcelas de cada comunidad, $NDVI_{ij}$ corresponde al NDVI de cada parcela que se encuentra dentro de la comunidad, y n_{ij} es el número de parcelas de la comunidad. (Salinas et al., 2017). En esta investigación se utilizó las bandas 8 y 4, obteniendo la ecuación:

$$NDV = \frac{B_8 - B_4}{B_8 + B_4} \quad [4]$$

Además, se analizó el CWSI, por ser considerado el índice verde más conocido y utilizado, en el que en forma general cuando se secan las hojas aumenta su reflectancia a lo largo de todo el espectro, produciendo un incremento en las bandas roja, en el infrarrojo medio y en las bandas de absorción de agua (Rock et al. 1985). Por lo que se puede definir como la determinación de la tasa de transpiración actual de un cultivo mediante la medición de la temperatura del dosel y el déficit de presión de vapor (López, Arteaga, Vásquez, López, y Sánchez, 2009).

El índice de estrés hídrico se calcula mediante la siguiente expresión:

$$CWSI = \frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR} \quad [5]$$

Donde:

NIR= Infrarrojo cercano

SWIR = Infrarrojo medio

Aplicando las bandas correspondientes al infrarrojo cercano en infrarrojo medio que utiliza Sentinel 2. (Alderfasi y Nielsen, 2001), se expresa con la fórmula:

$$CWSI = \frac{B8-B11}{B8+B11} \quad [6]$$

El SAVI, se aplica para que las alteraciones del valor del NDVI disminuyan en zonas áridas, debido a que puede corresponder a cubiertas vigorosas, pero poco densas o a cubiertas densas con poca vitalidad (Gonzaga, 2014). El SAVI se calcula mediante la siguiente expresión:

$$SAVI = \frac{IR-R}{IR+R+L} (1 + L) \quad [7]$$

Donde:

IR = corresponde al infrarrojo cercano

R = corresponde al rojo

L = parámetro que varía según la densidad de la vegetación, para densidades intermedias, para las imágenes de satélite, se toma 0.5.

El factor L (línea de suelo) es un parámetro que varía según la densidad de la vegetación y que está relacionado con la reflectividad del suelo. Para densidades intermedias, como en el caso de las imágenes de satélite, se toma L = 0.5. Este índice se utiliza con el fin de conseguir corregir algunos efectos externos al valor del NDVI en lugares donde el aporte de la reflectividad del suelo es elevada (Carvacho y Sánchez, 2010).

El SAVI se obtuvo con las bandas 8, 4 y con un valor L=0.5, aplicando la siguiente ecuación:

$$SAVI = \frac{B8-B4}{B8+B4+0.5} (1 + 0.5) \quad [8]$$

Register for free at <https://www.scipedia.com> to download the version without the watermark

Finalmente, se analizaron los índices resultantes utilizando softwares libres y comerciales especializados.

La georreferenciación de las parcelas se realizó utilizando el GPS de la marca Garmin modelo GPSMAP 62sc con un receptor de alta sensibilidad que tiene un margen de error de ±4 metros, los datos tomados fueron verificados y validados antes del proceso cartográfico, combinando con la RGB (Red, Green, Blue) obtenida del Satélite Sentinel 2A.

3. Resultados y discusión

Como consecuencia de este estudio se obtuvo que el 10.73 % del total de cultivo de tuna que existe en el Ecuador está en la zona de estudio; esto es aproximadamente 19.31 ha repartidas en 66 parcelas a lo largo de las dos parroquias que se indica anteriormente de las 180 ha cultivadas en todo el territorio. Como muestra la *Tabla 1*.

Tabla 1. Número de parcelas y extensión

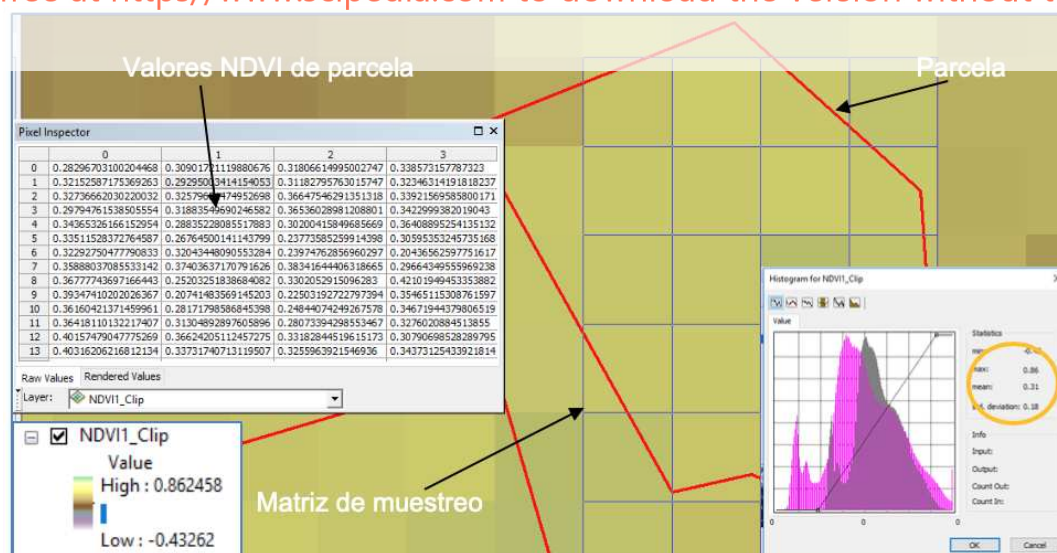
Comunidades	n.º de parcelas	Extensión /Comunidad (ha)
Alacao	7	1.70147
Chingazo	18	5.06211
Carrera Ambato	5	0.43532
Ela	3	0.90013
San José de Chocón	6	0.78335
San José de Juntuz	2	4.02495
Santa Rosa de Guano	5	1.90007
Miraflores	6	1.48802
La Unión	5	1,15708
San Andrés	2	0.29109
La Merced	7	1.56155
TOTAL	66	19.30514

Del muestreo obtenido en la imagen de las parcelas cultivadas de tuna se obtuvo los valores máximo y mínimo, es así que en comunidad la Unión se obtuvo un valor del NDVI de 0.40 y San Andrés con el 0.41, mientras que los valores más bajos están en las comunidades de Chingazo, Chocón y San José de Juntuz con un índice de 0.27; por lo tanto, el resultado obtenido se encuentra en el rango promedio de 0.27 a 0.41, evidentemente es un dato relativo de acuerdo a las circunstancias y la resolución de la imagen analizada.

Con estos antecedentes, el valor promedio obtenido del NDVI es de 0.31 de todas las parcelas muestreadas en el área. Como muestra la Figura 2.

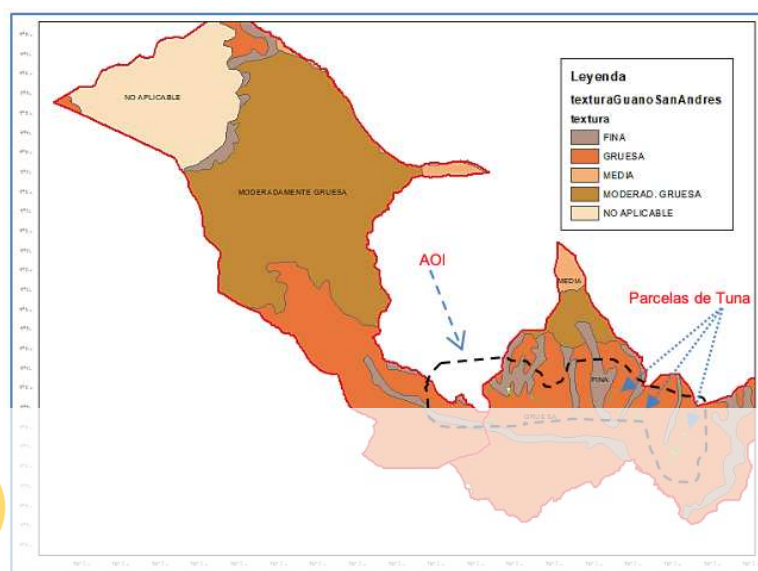
Figura 2. Ejemplo de muestreo promedio de los valores de NDVI en las parcelas muestreadas

Register for free at <https://www.scipedia.com> to download the version without the watermark



Se determinó la textura del suelo en la zona de cultivo de tuna, sobreponiendo las capas de cartografía del cantón Guano con la capa de textura de suelo proporcionado por el SNI del Ecuador, dando como resultado que el 99.9 % es gruesa, y un 0.1 % es fina. Como muestra la Figura 2.

Figura 2. Tipo de suelo en parcelas de tuna



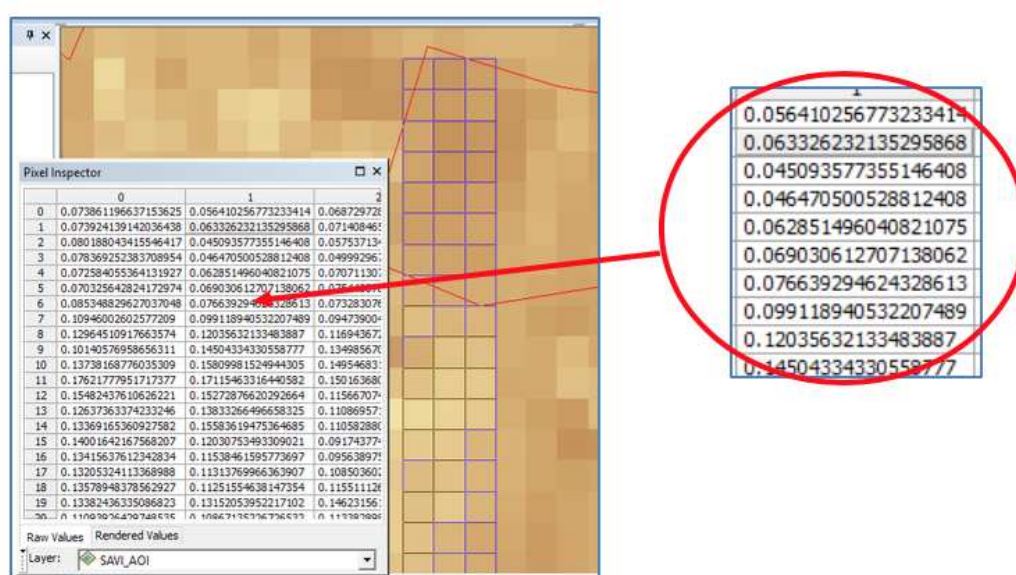
Además, se analizó el índice SAVI, determinando que para este tipo de textura (gruesa) la reflectancia recibida pertenece tanto al suelo como a la vegetación (tuna), mediante el cálculo de raster con las bandas 8 y 4 sumado el parámetro L con un valor de 0.5, se obtuvo valores referenciales aproximados bajos que pueden indicar que el cultivo de tuna tiene una cubierta de vegetación verde moderada como muestra la Figura 3:

$$SAVI = \frac{B8-B4}{(B8+B4+0.5)} * (1 + 0.5)$$

[9]

Register for free at <https://www.scipedia.com> to download the version without the watermark

Figura 3. Ejemplo de muestreo de valores SAVI



Register for free at <https://www.scipedia.com> to download the version without the watermark

que varían desde 4 hasta 21 puntos dependiendo del tamaño del área cultivada. Los datos se



tud, la altura y la ubicación de la parcela en cada parroquia, para posteriormente importar en el

software ArcMap 10.3⁶ de ArcGIS y con la ayuda de herramientas especializadas, se dibuja cada parcela sobre el mapa base de la textura de suelo.

El diseño de las tablas de registro de los datos contiene los siguientes campos: *ID*, *X*, *Y*, *Z*

```
6      SERVER this_host ANY 27000
```


Tabla 4. Diseño de tablas de registro de datos

ID	X	Y	Z	UBICACIÓN
T1	768321	9820868	2654	Chingazo Alto
T2	768278	9820842	2651	Chingazo Alto
T3	768218	9820804	2651	Chingazo Alto
T4	768197	9820831	2651	Chingazo Alto
T5	768261	9820871	2652	Chingazo Alto
T6	768246	9820898	2649	Chingazo Alto
T7	768246	9820903	2656	Chingazo Alto
T8	768237	9820908	2654	Chingazo Alto
T9	768223	9820897	2652	Chingazo Alto
T10	768195	9820938	2650	Chingazo Alto
T11	768163	9820986	2649	Chingazo Alto
T12	768215	9821037	2653	Chingazo Alto
T13	768264	9820963	2655	Chingazo Alto
T14	768290	9820963	2655	Chingazo Alto

Donde:

ID = número de punto

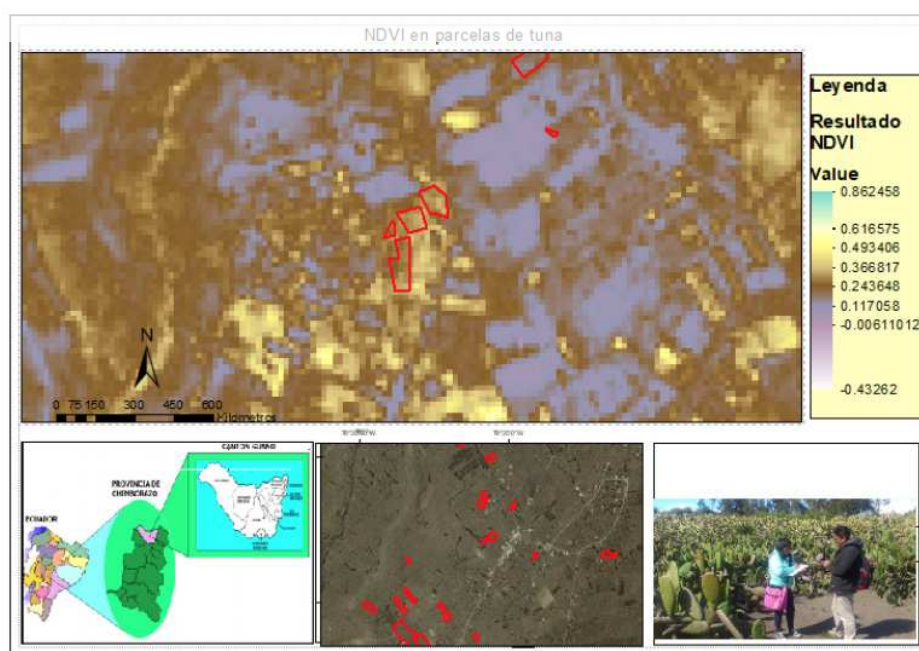
X, Y, Z = valores de latitud, longitud y altura

UBICACIÓN = nombre de la comunidad

Una vez importados los datos del GPS a la hoja de cálculo e importados a un programa comercial especializado, con la ayuda de las herramientas de importación y representación sobre el mapa base se obtuvo el resultado final como muestra la Figura 5.

Register for free at <https://www.scipedia.com> to download the version without the watermark

Figura 5. Resultados de NDVI del ROI



El mapa base utilizado es del servidor Maps de Microsoft, descargado utilizando el buscador Bing en el programa SasPlanet.

Sobre este tema existen publicaciones que han tratado comparaciones entre índices NDVI, SAVI, TSAVI y NDII, en el contexto de los ecosistemas áridos y semiáridos en la parte central de la península de Baja California, demostrando que las variaciones espaciales y temporales no son paralelas, sin embargo, las diferencias entre NDVI y SAVI son relativamente menores (Rodríguez y Bullock, 2018).

En el artículo "Relaciones entre la precipitación, producción de biomasa e índices espectrales de la vegetación: alcances y limitaciones" publicado en marzo de 2018 modelan la relación entre el índice espectral NDVI_{cp} de la biomasa con la precipitación total, usando modelos relativamente simples de procesos ecológicos y de manejo, desarrollando un modelo híbrido de aproximación (sensores remotos y modelos biofísicos) en el manejo de pastizales tropicales y bosques/selva (Paz y Díaz, 2018)

En el estudio "Multispectral aerial image processing system for precisión agriculture", realizado en el año 2018, señalan que con la ayuda de ortofotos generaron los índices NDVI, GNDVI y SAVI sobre parcelas de caña de azúcar para identificar problemas de crecimiento en los surcos y tomar medidas en áreas puntuales de los cultivos. (Kharuf-Gutierrez, Orozco-Morales, Aday Díaz, y Pineda Ruiz, 2018). En esta investigación el estudio realizado de los cultivos de tuna se obtiene los índices NDVI, CWSI y SAVI con una imagen SENTINEL 2A, mejorando su resolución con correcciones radiométricas y atmosféricas, obteniendo resultados aproximados y referenciales, debido a que también existen otros factores importantes que influyen en el estado de salud del cultivo como son la fenología del cultivo, precipitación y temperatura, entre otros que no han sido considerados.

Una de las ventajas más importantes de este estudio es que se puede utilizar la reflectancia captada por los sensores de cualquier tipo de cultivo, en este caso de la tuna, para determinar los índices adecuados que permitan realizar un análisis profundo del comportamiento de la misma.

Register for free at <https://www.scipedia.com> to download the version without the watermark

El procedimiento seguido en esta investigación deja abierta la posibilidad para que en el futuro se pruebe métodos alternos que conduzcan a nuevas conclusiones y sugerencias para el incremento de la producción de la tuna con el sistema de riego adecuado.

4. Conclusiones y recomendaciones

Los índices obtenidos en esta investigación son referenciales y aproximados y pueden ayudar al incremento de la producción de tuna de los agricultores del sector con la implementación de un sistema de riego de agua por goteo, considerando que en la actualidad se riega solo con agua de lluvia.

El índice de vegetación SAVI disminuye las alteraciones del valor del NDVI, influyendo en el estado vegetativo de un cultivo de tuna debido a que la zona es árida, considerando el valor de parámetro L para densidades intermedias.

El índice CWSI, obtenido mediante la medición de la temperatura del dosel y el déficit del valor de presión, indica que la tasa de transpiración es mínima en la plantación de tuna estudiada.

Para obtener valores más exactos de los índices en el cultivo de tuna es recomendable utilizar imágenes de menor resolución.

Las muestras han sido cultivadas en una parcela de en un área de 0.8 ha para realizar un seguimiento minucioso del crecimiento, número de brotes, grosor, número de frutos, entre otros datos con la implementación de un sistema de riego por goteo.

Bibliografía

- Alderfasi, A. A., y Nielsen, D. C. (2001). Use of crop water stress index for monitoring water status and scheduling irrigation in wheat. *Agricultural Water Management*, 47 (1): 69-75. [https://doi.org/10.1016/S0378-3774\(00\)00096-2](https://doi.org/10.1016/S0378-3774(00)00096-2)
- Amaya Robles, J. E. (2009). Cultivo de tuna (*Opuntia ficus indica*). *Gerencia Regional Agraria La Libertad*, 1-35. Retrieved from <http://www.agrolalibertad.gob.pe/sites/default/files/MANUAL TECNICO DE TUNA.pdf>
- Carvacho, L., y Sánchez, M. (2010). *Comparación de índices de vegetación a partir de imágenes modis en la región del libertador bernardo o'higgins, chile, en el período 2001-2005*. 728-737. Recuperado de http://www.age-geografia.es/tig/2010_Sevilla/ponencia3/CARVACHO.pdf
- Casella, A., Barrionuevo, N., Pezzola, A., y Winschel, C. (2018). Preprocesamiento de imágenes satelitales del sensor sentinel 2A y 2B con el software SNAP 6. 0. En *Instituto de Clima y Agua. C.I.R.N. INTA Castelar* (1-31).
- Díaz García-Cervigón, J. J. (2015). *Estudio de Índices de vegetación a partir de imágenes aéreas tomadas desde UAS/RPAS y aplicaciones de estos a la agricultura de precisión*. Recuperado http://eprints.ucm.es/31423/1/TFM_Juan_Diaz_Cervignon.pdf
- El Comercio. (2011, Octubre 15). La tuna cuatro variedades se producen en el país. *Negocios*, 1. Recuperado de <http://www.elcomercio.com/actualidad/negocios/tuna-cuatro-variedades-se-producen.html>
- Gilabert Navarro, M. A., García-Haro, F. J., y González Piqueras, J. (1997). Acerca de los índices de vegetación. *Revista de Teledetección*, 8: 1-10. Recuperado <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=942578&info=resumen&idioma=SPA>
- Gonzaga, C. (2014). Aplicación de Índices de Vegetación Derivados de Imágenes Satelitales Landsat 7 ETM + y ASTER para la Caracterización de la Cobertura Vegetal en la zona centro de la Provincia de Loja (Vol. 53). Recuperado de http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/34487/Documento_completo.pdf?sequence=1
- Kharuf-Gutiérrez, S., Orozco-Morales, R., Aday Díaz, O. de la C., y Pineda Ruiz, E. (2018). Multispectral aerial image processing system for precision agriculture. *Sistemas y Telemática*, 16 (47): 45-58. <https://doi.org/10.18046/syt.v16i47.3221>
- Diario La Hora. (2018, October 19). *La producción de tuna gana terreno en el Norte*. p. 1. Recuperado de <https://www.lahora.com.ec/noticia/1101222817/la-produccion-de-tuna-gana-terreno-en-el-norte>
- Leiva, F. (2003). La agricultura de precisión: una producción más sostenible y competitiva con visión futurista. *VIII Congreso de La Sociedad de Fitomejoramiento y Producción de Cultivos, D. C.*, (May), 7. Recuperado de https://www.researchgate.net/profile/Fabio_Leiva/publication/228425520_La_agricultura_de_precision_una_produccion_mas_sostenible_y_competitiva_con_vision_futurista/links/555ce20508ae8c0cab2a6901/La-agricultura-de-precision-una-produccion-mas-sostenible-y-
- López Orozco, M., Mercado Flores, J., Martínez Soto, G., y Magaña Ramírez, J. L. (2011). Formulación de una mermelada a partir de pulpa y cáscara de tunas (*Opuntia* spp.) elaborada a nivel planta piloto. *Revistas Científicas Electrónicas Españolas y Latinoamericanas*, 21(2): 31-36. Recuperado de <https://www.redalyc.org/pdf/416/41619838004.pdf>

- López, R., Arteaga, R., Vásquez, M., López, I., y Sánchez, I. (2009). Índice de estrés hídrico como un indicador del momento de riego en cultivos agrícolas. *Agricultura Técnica en México*, 35: 97-111. Recuperado de <http://www.scielo.org.mx/pdf/agritm/v35n1/v35n1a10.pdf>
- Maggi, E. (2017, october 24). *La tuna genera recursos a 600 campesinos de Guano*. Recuperado de <https://www.eltelegrafo.com.ec/noticias/regional/1/la-tuna-genera-recursos-a-600-campesinos-de-guano>
- Márquez, C. (2018). La tuna atrae a más agricultores. *Revista Líderes*. Recuperado de <http://www.revista-lideres.ec/lideres/tuna-agricultores-chimborazo-cultivos-produccion.html>
- Paz, F., y Díaz, H. (2018). Relaciones entre la precipitación, producción de biomasa e índices espectrales de la vegetación: alcances y limitaciones. *Terra latinoam*, 36 (2): 153-168. Recuperado de <http://www.scielo.org.mx/pdf/tl/v36n2/2395-8030-tl-36-02-153.pdf>
- Rodríguez, V. M., y Bullock, S. H. (2018). Comparación espacial y temporal de índices de la vegetación para verdor y humedad y aplicación para estimar LAI en el Desierto Sonorense. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 4 (4): 611-623. <https://doi.org/10.29312/remexca.v4i4.1193>
- Ruiz, V., Savé, R., y Herrera Herrera, A. (2014). Análisis multitemporal del cambio de uso del suelo, en el Paisaje Terrestre Protegido Miraflores Moropotente Nicaragua, 1993-2011. *Revista Científica de FAREM-Estelí*, 22 (11): 57-68. <https://doi.org/10.5377/farem.v0i11.1605>
- Salinas, C., Octavio, R., Martínez, O., y Morales, V. (2017). Tendencia en el siglo XXI del Índice de Diferencias Normalizadas de Vegetación (NDVI) en la parte sur de la península de Baja California Trend in the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) in the Southern Part of Baja California Peninsula. *Investigaciones Geográficas: Boletín Del Instituto de Geografía* (94): 82-90. <https://doi.org/10.14350/rig.57214>
- Varela, Y., Caldera, A. K., Zegbe, J. A., Mena, A., y Serna, J. (2014). *El riego en nopal influye en el almacenamiento y acondicionamiento de la tuna * Irrigation in nopal influences the storage and packaging of tuna Resumen Introducción Materiales y métodos*. 5: 1377-1390. Recuperado de <http://www.scielo.org.mx/pdf/remexca/v5n8/v5n8a4.pdf>